Politechnika Łódzka
Instytut Inżynierii Materiałowej

Prof. dr hab. inż. Leszek Klimek

Łódź 04. 04. 2022r

OCENA

całokształtu dorobku naukowego dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego w związku z ubieganiem się o stopień naukowy doktora habilitowanego_w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa na podstawie cyklu publikacji pt.: *Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych.*

Podstawą opracowania opinii jest pismo Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 11. 02. 2022r. w związku z Uchwałą nr 167/II/2021 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa z dnia 17. 12. 202.

I. Sylwetka Kandydata

Dr inż. Paweł Piotr Michałowski stopień magistra uzyskał w roku 2006 na Faculty of Physics, Umeå University za pracę zatytułowaną *Production of Li intercalated C60 films and implementation into electronic devices* oraz, co ciekawe drugi raz w roku 2007 na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu za pracę p.t. *Badanie wpływu procesu fotopolimeryzacji fulerenów przy użyciu metody SIMS*.

Stopień doktora nauk fizycznych w dyscyplinie fizyka, specjalność: fizyka cienkich warstw uzyskał w roku 2015 na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, za pracę zatytułowaną *Diffusion and structural changes in Al1xSixOy thin films investigated by Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy*.

Biorąc pod uwagę tematykę prac magisterskich i doktorskiej można stwierdzić, że spektrometria mas stanowiła tematykę jego zainteresowań już od początku kariery naukowej. W zasadzie, od realizacji drugiej pracy magisterskiej Habilitant podąża dość spójną ścieżką badawczą dotyczącą właśnie spektrometrii mas.

Swoją pracę zawodową rozpoczął w Fraunhofer Center Nanoelektronische Technologien, Drezno, Niemcy gdzie był zatrudniony na stanowisku asystenta w latach 2007 – 2010. Od 2015 roku pracował w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, a następnie po przekształceniach w Sieci Badawczej Łukasiewicza w Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki w Warszawie. W załączonym w dokumentacji habilitacyjnej autoreferacie brakuje okresu zatrudnienia w latach 07. 2010 – 03. 2015.

Jak wspomniano wcześniej swoją pracę zawodową Kandydat rozpoczął w Fraunhofer Center Nanoelektronische Technologien, Drezno gdzie pracował prawie cztery lata. Zwyczajowo, za współpracę zagraniczną przyjmuje się odbycie jednego lub kilku staży w jednostkach spoza Polski. Po zrobieniu doktoratu Habilitant nie odbył żadnego stażu w instytucji zagranicznej czy też krajowej. Jego praca ograniczała się tylko do Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie. Jednak analizując publikacje naukowe Habilitanta daje się zauważyć, że bardzo dużo z nich powstało przy współpracy z innymi ośrodkami, w tym zagranicznymi. Widać również innego rodzaju współpracę międzynarodową np. w ramach projektów realizowanych z jednostkami zagranicznymi, wykładów wygłaszanych na uczelniach zagranicznych. Ponieważ ustawa nie precyzuje, co należy rozumieć przez aktywność zawodową w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, zdaniem recenzenta wspólne publikacje tego typu są niewątpliwym dowodem na aktywność zawodową w więcej niż jednej instytucji. **Należy więc uznać, że tym samym spełniony został warunek aktywności naukowej w więcej niż w jednej uczelni, instytucji naukowej**

II. Ocena Osiągnięcia Naukowego

Osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 219 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668) dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego zostało przedstawione w formie szesnastu spójnych prac H1 – H16 zebranych pod wspólnym tytułem *Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych*, opublikowanych w latach 2016 – 2021 w czasopismach z listy JCR o uśrednionym współczynniku oddziaływania na poziomie 4,13 (sumaryczny IF tych prac wynosi 66,074). Należy zaznaczyć, że czasopisma, w których zostały opublikowane prace mają wysoką renomę międzynarodową. Dwie pozycje z cyklu (H13 i H14) są samodzielnymi publikacjami habilitanta, a w pozostałych jest pierwszym autorem, a więc tym, który wykonuje największą pracę w realizowanym projekcie naukowym. Z deklarowanego udziału, potwierdzonego oświadczeniami współautorów wynika jasno wyodrębniony i wiodący indywidualny wkład Kandydata w przygotowanie publikacji współautorskich. W pracach wchodzących w cykl publikacji jego udział polegał głównie na formułowaniu hipotez badawczych, opracowaniu procedur badawczych adekwatnych do stawianych problemów, wykonaniu większości badań, szczególnie metodą Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych, ale nie tylko, analizy otrzymanych wyników, sformułowanie głównych wniosków i w znacznym stopniu był autorem treści tych artykułów. Dowodzi to dojrzałości naukowej Habilitanta, pokazuje jego zdolność do samodzielnego prowadzenia badań naukowych i zarządzania zespołem badawczym.

Jak wynika z tytułu przedstawionego osiągnięcia naukowego prace dotyczą charakteryzacji różnego rodzaju struktur półprzewodnikowych. Poczynając od grafenu poprzez warstwy MoS_2, tlenek cynku, azotki galu, półprzewodniki AlInAs/InGaAs i inne. Koncentrowały się one głownie na określaniu przestrzennego rozkładu pierwiastków metodą SIMS, co pozwalało na wyciąganie wniosków dotyczących ich budowy i zachowania się. Aby jednak można było to zrobić należało opracować odpowiednie procedury badawcze dedykowane do tego typu materiałów. W obecnych czasach pojawia się wiele ultracienkich struktur o grubościach

nanometrycznych, czego najlepszym przykładem jest grafen. Dzięki różnego typu udoskonaleniom współczesne spektrometry SIMS pozwalają na ich badanie z subnanometrową rozdzielczością wgłębną, jednak w wielu przypadkach wynik analizy nie jest zadowalający ze względu na pogarszającą się granice wykrywalności. W związku z powyższym celem, który postawił sobie Habilitant, było rozszerzenie funkcjonalności SIMS i umożliwienie charakteryzacji z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną oraz wykonanie badań na materiałach, które wymagają takiej rozdzielczości. Aby ten cel osiągnąć, stworzył szereg dedykowanych procedur pomiarowych. Kolejne prace pokazują, jak Habilitant rozwijał swoją hipotezę naukową dotyczącą opracowania tej metody na podstawie analizy otrzymanych wczesniej wyników. Dowodzi to dojrzałości naukowej Kandydata i zolności do samodzielnego prowadzenia badań. Biorąc pod uwagę, że wszystkie analizy SIMS wykonywał samodzielnie, świadczy to też o opanowaniu warsztatu eksperymentalnego.

W toku prowadzonych prac okazało się, że nie można stworzyć uniwersalnej procedury dla wszystkich materiałów. Dla każdego badanego materiału, każdego wybranego jonu wtórnego oraz każdej energii i gęstości wiązki pierwotnej należało opracować oddzielną, dedykowanej tylko dla niego optymalizację procedury. Biorąc pod uwagę kombinacje ilości stosowanych materiałów i pozostałych parametrów praca nad stworzeniem konkretnych procedur wydawała się ogromna. Jednak Kandydat zauważył, że dla podobnych materiałów i/lub wybranych jonów można dostosować już istniejącą procedurę, a nie opracowywać takową od początku, co pozwoliło zaoszczędzić czas.

Początkowe jego badania przedstawione w pracach [H1 – H5] dotyczyły analizy grafenu. Uzyskane w ich wyniku badania umożliwiły stworzenie metody wykorzystującej efekt nazwany przez niego (GESIMS) Graphene Enhanced Secondary Ion Mass, nazwanej Spectrometry (GESIMS) i opisanej w pracach [H2 i H5]. Eksperymentalnie udowodnił, że jeśli częściowo zniszczy się warstwę grafenu poprzez bombardowanie jonowe, to zmniejszony zostanie efekt blokowania, natomiast zachowane zostanie zwiększenie prawdopodobieństwa jonizacji. W ten sposób można badać ultra cienkie materiały z poprawionymi granicami wykrywalności. Opracowana procedura pozwala osiągnąć granice wykrywalności poniżej 1 ppm dla większości zanieczyszczeń. Opracowana metoda wykorzystana została także w badaniach innych materiałów; AlInAs/InGaAs praca[H3], tlenku cynku implantowanego jonami iterbu praca [H6], siarczku molibdenu praca [H8 i H9], azotku boru praca [H10], azotku galu [H11], InGaN praca [H12].

Jak wcześniej zaznaczono Kandydat sukcesywnie rozwijał swoją hipotezę naukową dotyczącą opracowania tej metody na podstawie analizy otrzymanych wczesniej wyników. Kolejnym dowodem na to, są prace [H7 i H8]. Analizując krytycznie swoje poprzednie wyniki zauwazył, ze opracowana przez niego metoda analizy z dokładnoscią subnanometrową praktycznie nie sprawdza się dla badań elementów 2D położonyhch głębiej pod powierzchnią, z uwagi na niską efektywnośc rozpylania, a tym samym długi czas. Efektem tych rozważań było opracowanie metody nazwanej a-crater-with-in-a-crater (krater w kraterze) gdzie wysokoenergetyczna wiązka jonów pierwotnych została wykorzystana do szybkiego usunięcia większości materiału tworzącego duży krater. Następnie energia została znacznie zmniejszona i na dnie poprzedniego powstał nowy, mniejszy krater. W pobliżu interesującego obszaru energia padających jonów została zmniejszona do 150 eV, a zatem najbardziej istotna część próbki mogła być analizowana. Analiza wyników otrzymanych we wcześniejszych badaniach

posłużyła także do modyfikacji metody Miwa et al, wypracowanie podejścia zwanego supercyklem praktycznie eliminującego zbieranie danych z różnych głębokości przy zachowaniu wysokiego natężenia sygnałów.

Opracowane przez Habilitanta procedury oraz modyfikacje pozwoliły na przeprowadzenie badań SIMS z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną, co przedstawiono w artykułach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Uzyskane przez niego wyniki przeprowadzonych badań rozwiązały liczne problemy technologiczne związane ze wzrostem materiałów, ich właściwościami, a także działaniem przyrządów wykonanych z tych materiałów. Rozwiązania te są w wielu przypadkach unikatowe i bardzo trudno byłoby dojść do analogicznych wniosków wykorzystując inne techniki badawcze.

Aktywność naukowa Habilitanta udokumentowana wskazanymi przez niego pracami ma charakter interdysyplinarny, co w obecnych czasach jest bardzo cenione, tj. obejmuje problmatykę z zakresu inżynierii materiałowej, a także fizyki półprzewodników i, co za tym idzie, elektroniki. W pierwszym z tych obszarów odnosi się do badań budowy, składu badanych materiałów, a w drugim do budowy materiałów półprzewodnikowych, zaburzeń tej budowy, co w konsekwencji może mieć wpływ na ich zachowanie. Na pewien nacisk na drugą z tych grup wskazuje zestaw czasopism do jakich zgłoszono publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (*Applied Physics Letters, Physical Chemistry Chemical Physics, Chemical Communications*).

W swoim autoreferacie Kandydat przedstawił również swoje przyszłe plany badawcze, co jest szczególnie cenne i potwierdza, że ma przemyślany dalszy rozwój swojego warsztatu badawczego, a w przyszłości być może własnej szkoły naukowej. Jak sam pisze: „moje dążenie do poprawy jakości pomiarów SIMS jeszcze się nie skończyło. Staram się ciągle doskonalić dedykowane procedury i wierzę, że staję się w tym coraz lepszy". Kilka z przedstawionych w osiągnięciu procedur już zostało poprawionych i pozwoliło osiągnąć lepsze rezultaty.

Wymagania formalne odnośnie nadawania stopnia doktora habilitowanego (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce / Dz. U. z 2020 r poz. 85; Art. 219.pkt 2b) stanowią, że nadaje się go osobie, która ma w swoim dorobku oryginalne osiągnięcie naukowe w dyscyplinie, w której złożony został wniosek. Udokumentowaniem osiągnięcia może być zestaw powiązanych tematycznie publikacji naukowych. Zaprezentowany przez dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego zestaw jest spójny tematycznie i co do zasady spełnia warunek konieczny ustawy. Wszystkie prace nakierowane są na ten sam główny cel tj. opracowanie metod pozwalających na pomiarach metodą SIMS z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną. **Stwierdzam, że przedstawione osiągnięcie stanowiące zbiór publikacji pod wspólnym tytułem *Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych* spełnia podstawowe wymagania ustawowe w zakresie osiągnięcia naukowego niezbędne do uzyskania stopnia doktora habilitowanego.**

III. Pozostała działalność naukowa

Dorobek naukowy Habilitanta, na dzień złożenia wniosku habilitacyjnego obejmował 47 publikacji, z czego 6 uzyskano przed ukończeniem doktoratu, a pozostałe po obronie rozprawy doktorskiej. Zdecydowana większość prac opublikowana została w czasopismach z listy JCR.

Kilką publikacji posiada bardzo wysoki IF, wynoszący ponad 9. Sumaryczny Impact Factor prac wynosi 178,251, z czego przed doktoratem 11,067, a po doktoracie 167,184. Należy więc uznać, że dorobek publikacyjny Habilitanta po obronie doktoratu został istotnie powiększony, zarówno jeśli chodzi o aspekt ilościowy, jak i jakościowy. Oprócz działalności publikacyjnej Kandydat prezentował wyniki swoich badań na 17 krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych oraz w ramach zaproszonych wykładów. Był także członkiem komitetów naukowych lub organizacyjnych dwóch konferencji. Wykonał 23 recenzje dla 10 czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym.

Biorąc pod uwagę rangę czasopism, w których publikował rezultaty swoich badań oraz konferencje naukowe w których brał aktywny udział prezentując te wyniki można stwierdzić, że w dziedzinie w której je prowadzi jest rozpoznawalny w środowisku. Jako pewne zaniedbanie ze strony Habilitanta można uznać, że nie zapewnił sobie członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych oraz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism, to ostatnie zależy nie tylko od niego i należy mieć nadzieję, że w najbliższym czasie w jego CV pojawi się ta aktywność.

W czasie swojej kariery naukowej był wykonawcą w ośmiu projektach naukowo-badawczych w większości międzynarodowych. W chwili obecnej jest kierownikiem dwóch takich projektów.

Jego aktywność naukowa została także doceniona poprzez przyznanie mu stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców oraz Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju w kategorii Naukowiec Przyszłości.

Współczynniki bibliometryczne Kandydata wynoszą odpowiednio według baz danych Web of Science, Scopus i Google Scholar:

Całkowita liczba cytowań 310/324/364

Liczba cytowani bez autocytowań 210/224/264

Indeks Hirscha z uwzględnieniem autocytowań 7/7/8,

Indeks Hirscha bez autocytowań 10/10/10

Analiza przedstawionych współczynników bibliometrycznych pozwala stwierdzić, że dorobek naukowy, publikacje i recenzje dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego został istotnie powiększony po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych i **że spełnia zdaniem recenzenta wymagania ustawowe stawiane kandydatowi na stopień doktora habilitowanego.**

IV. Pozostała działalność, w tym dorobek organizacyjny, dydaktyczny i popularyzatorski

Aktywność zawodowa Kandydata realizowana była w zasadzie w jednostkach naukowo-badawczych. Z tego powodu Jego dorobek dydaktyczny nie jest zbyt wielki. Jednak mimo tego daje się zauważyć działalność dydaktyczną i popularyzatorską przejawiającą się opieką nad studentami jako promotor pomocniczy prac dyplomowych oraz opiekun praktyk studenckich. Wprawdzie samodzielnie nie był kierownikiem, ani nie prowadził żadnego przedmiotu w ramach dydaktyki na studiach wyższych, jednak prowadził pojedyncze wykłady z techniki SIMS dla studentów Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Jego aktywność popularyzatorska skupiała się głownie na prezentowaniu różnych aspektów technik

SIMS, zarówno w ośrodkach krajowych, jak i zagranicznych. W ocenie Habilitanta należy także uwzględnić jego współpracę z otoczeniem gospodarczym. W prawdzie w swoim dorobku nie ma patentów czy zgłoszeń patentowych, ale znajdują się tam wdrożenia technologiczne. Dotyczą one głownie opracowania dedykowanych procedur SIMS dla partnerów przemysłowych w zakresie badań elementów elektronicznych.

V. Podsumowanie i wniosek końcowy

Habilitant jest aktywnym uczonym działającym w warunkach międzynarodowych i osiągającym w pracy badawczej bardzo dobre rezultaty udokumentowane wysokiej jakości publikacjami oraz uczestnictwem w licznych projektach naukowych.

Na podstawie przedłożonego do oceny monotematycznego zbioru publikacji naukowych, dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr inż. Pawła Piotra Michałowskiego stwierdzam, że:

a. osiągnięcie naukowe stanowiące zbiór 16 interdyscyplinarnych prac naukowych opublikowanych na łamach czasopism z listy Journal Citation Reports, których Impact Factor zawiera się w przedziale od 3,399 do 8,456 (a więc stosunkowo wysokim), pod wspólnym tytułem *Charakteryzacja struktur półprzewodnikowych z nanometrową i subnanometrową rozdzielczością wgłębną przy użyciu metody Spektrometrii Mas Jonów Wtórnych* stanowi istotny i innowacyjny wkład w rozwój w dziedzinie: nauki inżynieryjno-techniczne w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
b. dorobek naukowy, z wyłączeniem publikacji stanowiących podstawę ubiegania się o habilitację, jest oryginalny i wartościowy oraz wskazuje na wysoką aktywność naukową, w tym z wieloma czołowymi ośrodkami naukowymi na świecie;
c. Kandydat w sposób wystarczający spełnia wymagania dotyczące zakresu prowadzonych zajęć dydaktycznych oraz działań popularyzatorskich. Natomiast w sposób wyższy niż przeciętny spełnia wymagania w zakresie współpracy międzynarodowej, co w przyszłości powinno stawiać go w grupie naukowców zdolnych pracować samodzielnie, a także budować wokół siebie międzynarodowe zespoły badawcze z czołowymi naukowcami na świecie.

Na podstawie powyższego stwierdzam, że dr inż. Paweł Piotr Michałowski spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Uwzględniając powyższe, popieram wniosek o dopuszczenie dr inż. Piotra Pawła Michałowskiego do dalszych etapów postępowania Habilitacyjnego, a w przypadku ich pozytywnego zakończenia o nadanie stopnia doktora habilitowanego dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Leszek Klimek